



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

Wanderson Maia Vinhas

**Implementação de Sistema Fotovoltaico trifásico conectado à rede via Plataforma
*Matlab/Simulink***

Uberlândia
2019

Wanderson Maia Vinhas

**Implementação de Sistema Fotovoltaico trifásico conectado à rede via Plataforma
*Matlab/Simulink***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Arthur Costa de Souza.

Uberlândia
2019

Wanderson Maia Vinhas

**Implementação de Sistema Fotovoltaico trifásico conectado à rede via Plataforma
*Matlab/Simulink***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração:

Uberlândia, 17 de dezembro de 2019

Banca Examinadora:

Arthur Costa de Souza – Mestre (UFU)

Adélio José de Moraes – Doutor (UFU)

Carlos Eduardo Tavares – Doutor (UFU)

Nome – Titulação (sigla da instituição)

Dedico este trabalho a meus pais, Benedito Alves Vinhas e Evanir da Silva Maia Vinhas, por se esforçarem em me proporcionar um ótimo ensino na minha adolescência, resultando no ingresso em uma universidade bem renomada e posteriormente por ter me dado todo suporte necessário para morar em uma cidade distante enquanto eu concluía a graduação.

À minha irmã Daniela que me inspirou a formar, por seu grande exemplo de responsabilidade e dedicação que a levaram a crescer bem profissionalmente.

Ao meu orientador Arthur, exemplo de ótimo profissional e grande amigo que não poupou esforços para me ajudar na escrita desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me iluminar, proteger, guiar e conceder forças para buscar meus objetivos.

À grande parte dos professores que tive até hoje e, em especial ao meu professor orientador Arthur Costa de Souza, por todo incentivo, colaboração, amizade, confiança e constantes ensinamentos, essenciais à concretização desta meta.

À minha família, em especial a meus pais, irmã e cunhado Vinicius Muzetti Bueno, pelo amor incondicional, paciência, compreensão, torcida e apoio na minha formação.

Aos meus amigos, em especial ao Wilson Junior e Thales Lima Oliveira, amigos de infância e que durante toda graduação conviveram comigo, por todos serem exemplos de companheirismo, apoio e amizade, além de proporcionarem momentos memoráveis e agradáveis de convívio.

RESUMO

A proposta deste trabalho foi apresentar a geração de energia fotovoltaica, destacando motivos para o estudo dela, além de mostrar sua presença no Brasil e no mundo. Foi realizado também o detalhamento de todos os elementos que compõem um sistema fotovoltaico trifásico, desde o painel fotovoltaico até os filtros de acoplamento, com maior destaque ao inversor e seu controle, essenciais para sincronizar o sinal de tensão de saída do arranjo fotovoltaico com o sinal de tensão da rede. Posteriormente foi feito o desenvolvimento de uma modelagem computacional de um sistema fotovoltaico trifásico de 10 kW, com o intuito de realizar diversos estudos no âmbito da conexão à rede elétrica. Por fim, foi discutido a importância desse trabalho no cenário da geração de energia elétrica e se seus objetivos foram alcançados.

Palavras-chave: Controle. Inversor. Modelagem computacional. Sistema fotovoltaico.

ABSTRACT

The purpose of this paper was to present the photovoltaic power generation, highlighting reasons for her study, besides showing its presence in Brazil and in the world. It was also performed the detailing of all elements that make up a three-phase photovoltaic system, from the photovoltaic panel to the coupling filters, with greater emphasis on the inverter and its control, essential to synchronize the output voltage signal of the photovoltaic array with the voltage signal on the grid. Subsequently, the development of a computational modeling of a 10 kW three phase photovoltaic system was carried out in order to carry out several studies in connection with the electric grid. Finally, it was discussed the importance of this work in the scenario of electric power generation and if its objectives were achieved.

Keywords: Control. Inverter. Computer modeling. Photovoltaic system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacidade Global de geração de energia fotovoltaica	13
Figura 2 - Diagrama resumido de um sistema fotovoltaico	15
Figura 3 - Total diário da irradiação global horizontal média anual	16
Figura 4 - Novos Investimentos Globais em energia renováveis em desenvolvimento de tecnologia, em países emergentes e desenvolvidos, 2017.....	17
Figura 5 - Curvas I -V em diferentes níveis de irradiância	20
Figura 6 - Curva P -V em diferentes níveis de irradiância.....	20
Figura 7 - Curvas I -V em três diferentes temperaturas.....	21
Figura 8 - Curvas P -V em três diferentes temperaturas	21
Figura 9 - Conversor <i>boost</i> com <i>MPPT</i> conectado ao módulo fotovoltaico.....	22
Figura 10 - Linearização dos pontos de máxima potência no módulo fotovoltaico	23
Figura 11 - Diagrama de bloco do controle do conversor <i>boost</i>	24
Figura 12 - Atuação do MPPT P&O no arranjo fotovoltaico	25
Figura 13 - Topologias de controle de corrente de inversor	25
Figura 14 - Controle no sistema d-q	26
Figura 15 - Inversor trifásico conectado à rede com filtro LCL.....	28
Figura 16 - Diagrama de bloco do sistema fotovoltaico	29
Figura 17 - Circuito equivalente do conversor <i>Boost</i>	31
Figura 18 - Conversor <i>Boost</i> elaborado no <i>Simulink</i>	31
Figura 19 - Sistema fotovoltaico com <i>Boost</i> e MPPT implementado.....	32
Figura 20 - Tensão na entrada e saída do conversor <i>Boost</i>	32
Figura 21 - Sistema fotovoltaico implementado no <i>Simulink</i>	34
Figura 22 - Tensão do barramento CC controlado pelo inversor	34
Figura 23 - Inversor implementado no <i>Simulink</i>	35
Figura 24 - Tensão e corrente no ponto de acoplamento e tensão no elo CC com o controle de corrente alternativo	36
Figura 25 - Tensão e corrente no ponto de acoplamento com sincronismo completo.....	36
Figura 26 - Potência ativa entregue à rede pelo inversor	37
Figura 27 - controlador PI do inversor implementado no <i>Simulink</i>	37
Figura 28 - Inversor trifásico com filtro LCL implementado no <i>Simulink</i>	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parametrização do módulo AMERICAN SOLAR ASW-260M.....	30
Tabela 2 - Parametrização do conversor <i>Boost</i>	30
Tabela 3 - Parametrização do conversor <i>Boost</i>	33
Tabela 4 - Parâmetros necessários para o cálculo do filtro LCL.....	40
Tabela 5 - Parametrização do filtro LCL	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de energia elétrica

CA- Corrente alternada

CC- Corrente contínua

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

GD - Geração distribuída

IEA - *International Energy Agency*

LCL - *Less Container Load*

MPP - *Maximum power point*

MPPT - *Maximum power point tracking*

MOSFET - *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia

P&O - *Perturb and observer*

PI - Proporcional integral

PLL - *phase locked loop*

PNE - Plano Nacional de Energia

PROINFA - Programa de Incentivos às fontes Alternativas de Energia Elétrica

SFV - Sistema fotovoltaico

SRFC - *Synchronous Reference Frame*

VSI – *Voltage Source Inverter*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	12
1.1	Considerações Iniciais	12
1.2	Motivações	13
1.3	Contextualização.....	14
1.4	Vantagens dos SFV frente aos outros métodos de geração de energia.....	15
1.5	Objetivos do trabalho	18
2	DESENVOLVIMENTO	19
2.1	Considerações Iniciais	19
2.2	Painel fotovoltaico.....	19
2.3	Conversor elevador de tensão (<i>Boost</i>).....	22
2.4	Ponto de máxima potência (MPP).....	22
2.5	MPPT P&O.....	24
2.6	Inversor e seus controles.....	25
2.7	Controlador PI e sua função transferência	27
2.8	Filtro LCL	27
3	ESTUDO COMPUTACIONAL DA MODELAGEM DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE VIA PLATAFORMA <i>MATLAB/SIMULINK</i>	29
3.1	Considerações iniciais	29
3.2	Parametrização do painel fotovoltaico	29
3.3	Apresentação do conversor boost no <i>Matlab/Simulink</i>	30
3.4	<i>Boost</i> conectado ao inversor no <i>Matlab/Simulink</i>	33
3.5	Implementação do filtro LCL no <i>Matlab/Simulink</i>	37
4	CONCLUSÃO.....	41
5	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO GERAL

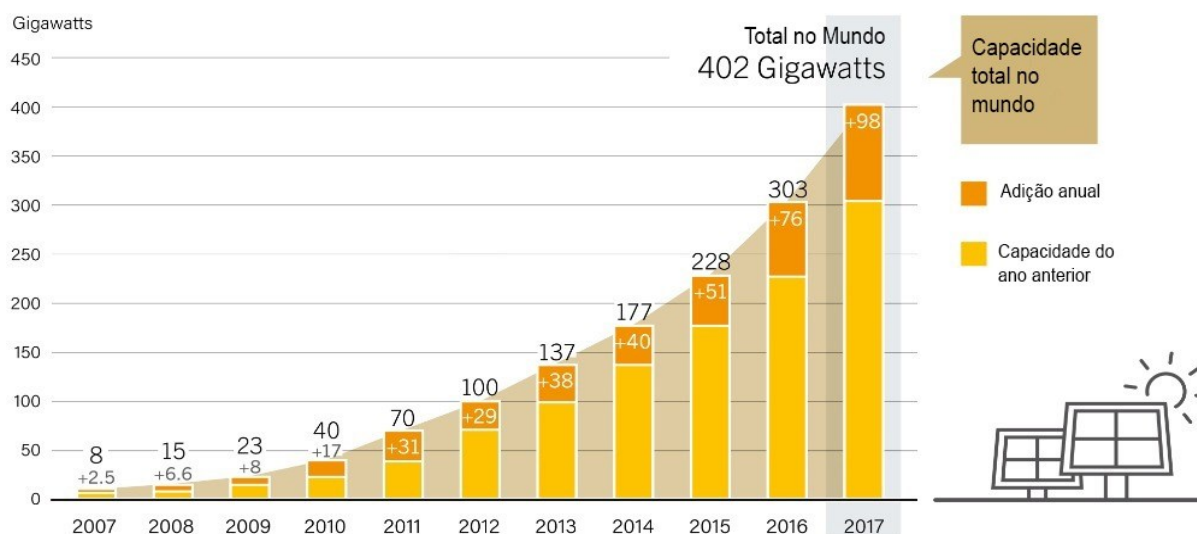
1.1 Considerações Iniciais

O Brasil, assim como a maioria dos países do mundo, procura expandir significativamente suas atividades comerciais e industriais, para tanto, torna-se imprescindível a busca de novos empreendimentos para elevar o fornecimento de energia elétrica, a fim de atender as crescentes demandas de energia.

Atualmente, a geração de energia elétrica no Brasil em sua grande maioria, é realizada por usinas hidrelétricas, devido à grande quantidade de recursos hídricos no território brasileiro, em seguida, vem as termelétricas com base da queima de combustíveis fósseis (carvão, óleo ou gás natural) para produção de energia elétrica. Para a expansão da matriz energética brasileira essas fontes já não são suficientes ou desejáveis, a primeira por ter quase toda sua capacidade de geração utilizada, enquanto a segunda esbarra no problema de ser uma fonte bem poluidora, podendo causar mais danos ao meio ambiente.

As fontes renováveis têm como características de serem limpa, abundante e rapidamente repostas na natureza, sendo elas: as fontes hídricas, eólicas, solares, biomassas, marés, e entre outras. As fontes renováveis de maior expectativa, com exceção das fontes hídricas, onde apresentam uma boa solução para os problemas ecológicos e atender novas demandas, ficam atribuídas a energia eólica, a qual é proveniente da força dos ventos e a solar fotovoltaica, que é oriunda da irradiação do sol, apresentando-se como ótimas opções, pois causam poucos impactos ambientais e estão frequentemente disponíveis em várias regiões do território brasileiro (Machado, 2016).

Dentre as alternativas supracitadas, a energia fotovoltaica tem se mostrado como uma opção viável e promissora para complementar e ampliar as vertentes do modelo de geração atualmente utilizado. O uso da energia fotovoltaica tem crescido de forma exponencial, se considerado o intervalo de 2007 a 2017 em escala mundial (REN21- Renewables Global Status Report, 2018), conforme observado na Figura 1, a seguir.

Figura 1 - Capacidade Global de geração de energia fotovoltaica

Fonte: Página do REN21- Renewables Global Status Report

A expansão da energia fotovoltaica pelo mundo tem sido grande nos últimos anos e futuramente, a energia solar poderá responder por cerca de 11% da oferta mundial de energia elétrica do mundo em 2050, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), isso representaria um valor próximo a 5.000 TWh (Ministério de Minas e Energia, 2017).

1.2 Motivações

O grande desenvolvimento industrial e comercial no mundo traz muitos benefícios à sociedade, mas quase toda evolução apresenta suas desvantagens, nesse caso a alta industrialização pode causar grandes impactos ambientais, reduzindo os recursos naturais, entre outros.

O aumento da geração de energia é necessário para acompanhar esse crescimento industrial e comercial. No Brasil, a melhor forma de fazer isso é usando fontes renováveis que não agredem tanto o meio ambiente, como os recursos hídricos já são bastante explorados, torna-se necessário a busca de outras alternativas (Chiu et al., 2013).

Quando se fala em fontes renováveis de energia no Brasil, é importante citar a resolução 482 da ANEEL implementada em abril de 2012, que garante ao consumidor a autorização para gerar energia elétrica a partir dessas fontes (eólica e solar), podendo até mesmo, fazer o fornecimento do excedente da energia gerada (energia que não foi consumida) para a rede de distribuição. Em 2015, foi feita a atualização dessa através da Resolução Normativa 687, que

modificaram os limites de potência que classificam a unidade geradora em micro ou mini geradores, neste sentido, o primeiro apresenta uma faixa de potência até 75kW, enquanto o segundo possui uma faixa entre 75kW a 5MW (Souza, 2016).

Essas normas, além de incentivar o uso de energia limpa, vieram para contribuir com o consumidor. A conexão deste com a rede da concessionária de energia elétrica permite que a energia entregue à rede produza um saldo, gerando assim um “crédito de energia” que pode ser usado para abater o valor correspondente à energia consumida, se o saldo do crédito ainda for maior, o consumidor poderá receber faturas do mês seguinte menores até zerar esse saldo de energia, ressaltando que há um limite de 60 meses de validade para realização desta ação (Souza, 2016).

O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2026), imposta pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), estima que a capacidade instalada de geração solar no território brasileiro alcance 13GW em 2026, sendo que a geração centralizada tenha 9.6 GW desse total e, a geração distribuída tenha os 3,4GW da parcela restante. A potência solar chegará a uma proporção de 5,7% do total (Ministério de Minas e Energia, 2017).

Já o Plano Nacional de Energia, fez estudos que estimaram em 78GW a potência de micro e mini GD solar em 2050, o que poderá representar 9% da oferta geral da energia elétrica no ano. Esses estudos são conhecidos como PNE 2050 e foram elaborados pela EPE (Ministério de Minas e Energia, 2017).

Levando em consideração esse aumento do consumo de energia e a preocupação em usar fontes renováveis para menor degradação do meio ambiente, este trabalho aborda sobre a energia solar, bem como a sua implementação no *software* Matlab, uma vez que, com a simulação em mãos torna-se possível prever eventuais problemas em que um sistema de energia fotovoltaica estará sujeito, assim como, suas respectivas perturbações que inerentemente gera na rede durante a sua operação. Por outro lado, a simulação possibilita testar possíveis soluções antes que o problema efetivamente ocorra na prática, economizando assim, tempo, recursos financeiros e humanos.

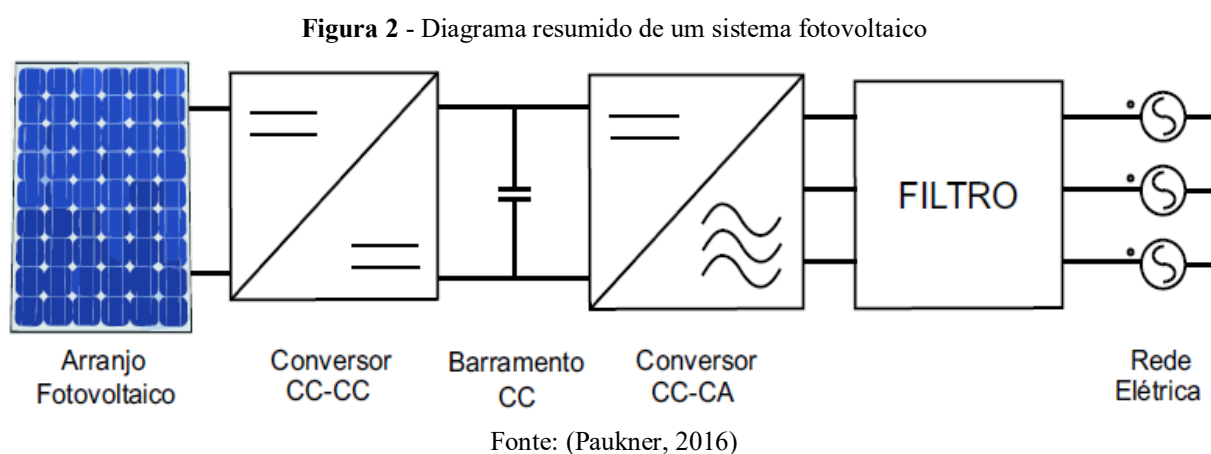
1.3 Contextualização

Como toda fonte de energia elétrica, a solar apresenta vantagens e desvantagens em sua utilização, das vantagens pode-se falar que as células fotovoltaicas estão ficando mais eficientes e baratas, por outro lado, pesa o fato de ser uma energia intermitente e que está presente somente em algumas horas do dia (Kjaer et al., 2005).

Os sistemas fotovoltaicos (SFVs) podem ser divididos em isolados e conectados à rede elétrica. Neste trabalho será abordado este último. Um sistema que procura operar sempre no máximo ponto de potência (MPP) e fazer injeção de corrente senoidal na rede, seja ela na rede de transmissão ou distribuição (Kjaer et al., 2005).

O sistema fotovoltaico utiliza vários equipamentos da eletrônica de potência para que seja possível integrar os módulos fotovoltaicos à rede elétrica, onde, o principal deles são os dispositivos chaveadores, que causam grandes preocupações na qualidade da energia elétrica quando há vários sistemas destes conectados à rede. Logo, o filtro e o controle do inversor são dois elementos que devem ser bem projetados para trazer maior segurança à rede elétrica (Machado, 2016).

O sistema fotovoltaico é composto, basicamente, por 4 unidades, sendo elas: o arranjo fotovoltaico (FV), o conversor CC-CC, o conversor CC-CA e o filtro de acoplamento. Cada um com funções bem específicas, que vão ser melhores exploradas nos capítulos subsequentes. Na Figura 2 é apresentada uma esquematização geral do SFV (Paukner, 2016).

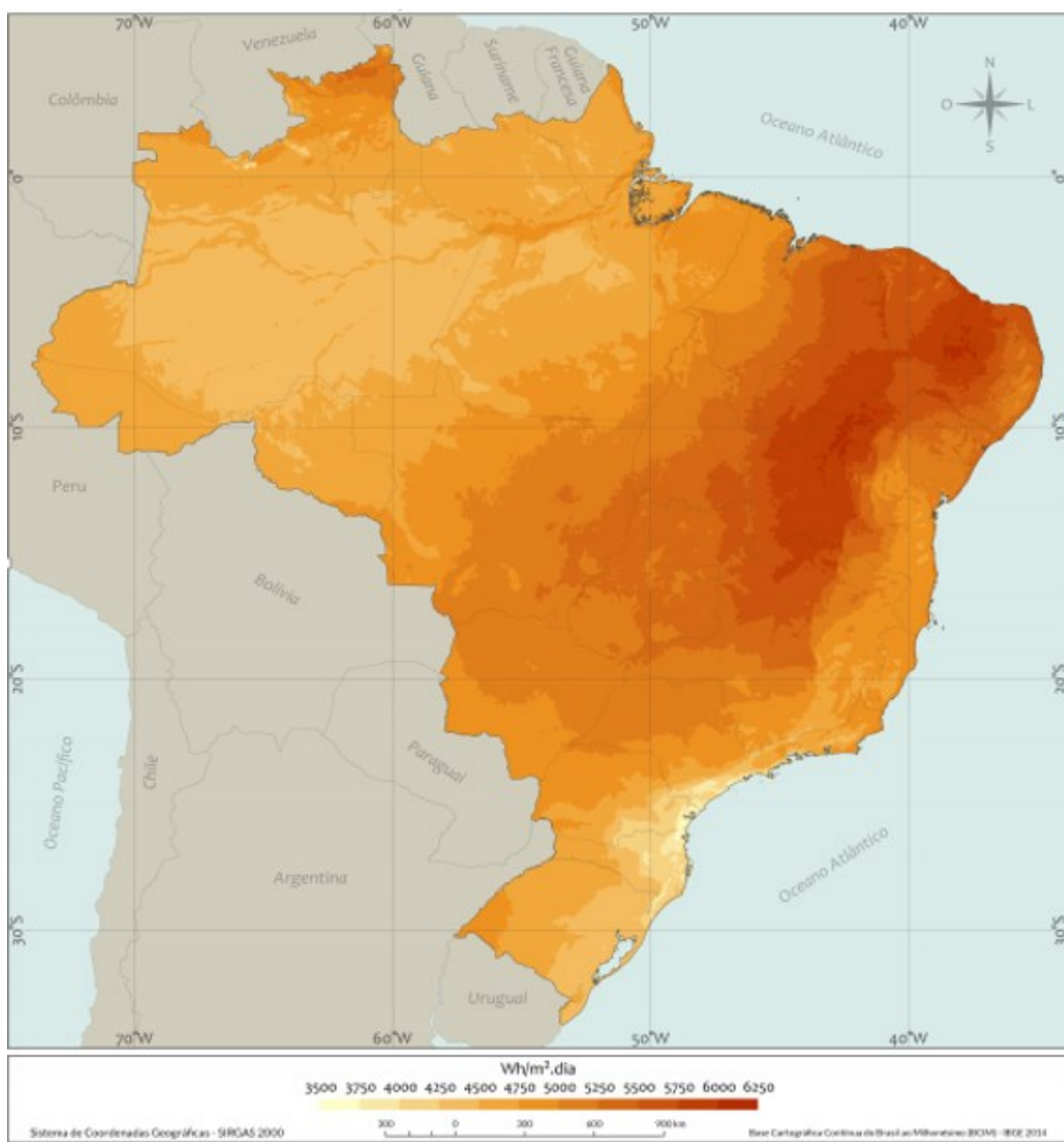


1.4 Vantagens dos SFV frente aos outros métodos de geração de energia

Quando se fala em fontes de energia para geração no Brasil, logo vem em mente, hidrelétrica ou termelétrica, mas essas são fontes que apresentam algumas limitações e inconveniências já citadas. Então das outras energias de características renováveis ou não renováveis (combustíveis fósseis), os critérios para empregar uma delas, devem ser muito bem fundamentados em aspectos econômicos e ambientais.

A nuclear, por exemplo, apresenta um risco ambiental bastante significativo, enquanto a eólica precisa de locais com grandes rajadas de ventos, já a solar necessita de áreas com grande irradiação solar e, em um país como o Brasil, tal condição meteorológico é bastante abundante, pois predomina o clima tropical na maioria das regiões, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 - Total diário da irradiação global horizontal média anual



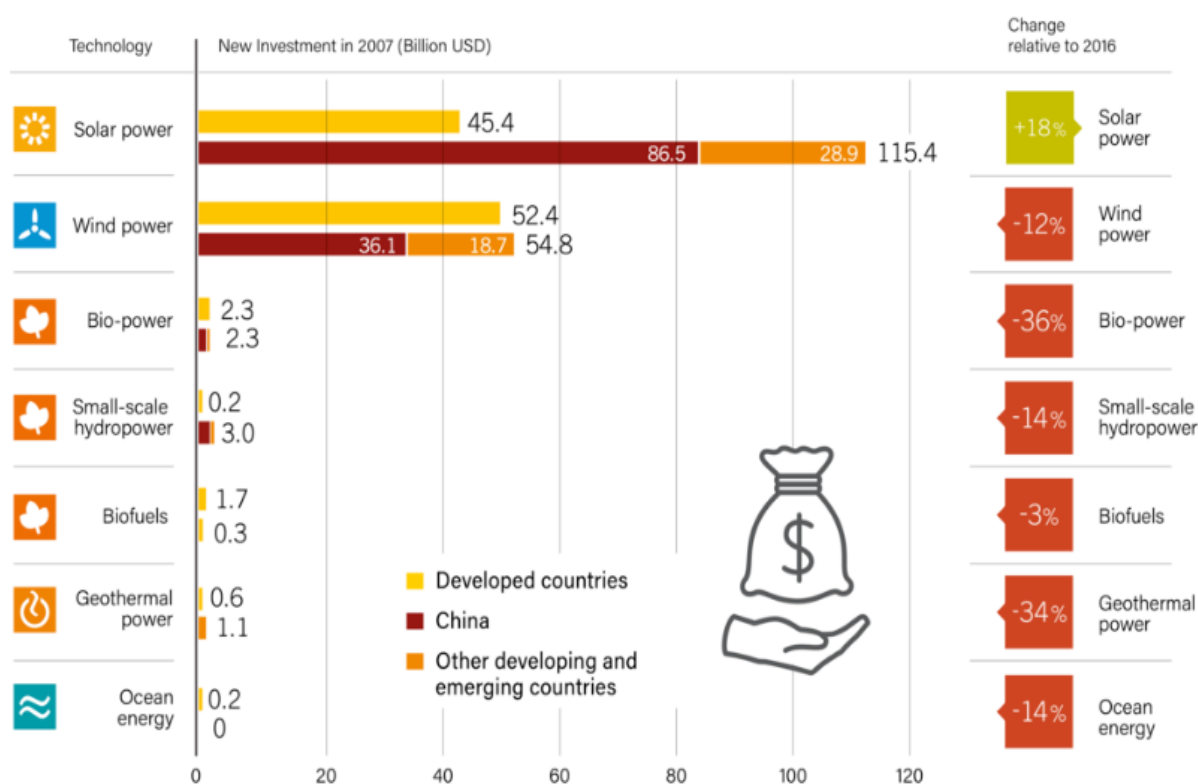
Fonte: Página do Atlas Brasileiro de Energia Solar

Como visto na Figura 3, o Brasil apresenta alta irradiação solar, destacando-se a região nordeste, onde favorece o emprego da energia solar (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2018).

O sistema fotovoltaico ainda não tem um custo menor que outras fontes de geração de energia, como a termelétrica que pode usar a queima do bagaço da cana ou carvão como fonte energética por exemplo, mas por outro lado, em relação a energia eólica, o custo para instalação em aspectos de infraestrutura, o SFV é mais econômico.

A aquisição dos equipamentos necessários para instalação dos SFVs, embora apresentassem seus custos bastantes elevados por um bom tempo, nos últimos anos, sua aquisição no mercado tornou-se mais acessível, diante da diminuição de impostos, garantias de tarifas mínimas e entre outras medidas governamentais (Reis, 2015). Vale destacar existência do PROINFA - Programa de Incentivos às fontes Alternativas de Energia Elétrica, o qual proporcionou estímulos e incentivos ao emprego destas fontes de energia. O crescimento da geração fotovoltaica tem crescido muito em relação às outras, como pode-se notar na Figura 4, que mostram os investimentos aplicados em energias renováveis, no âmbito mundial (REN21- Renewables Global Status Report, 2018).

Figura 4 - Novos Investimentos Globais em energia renováveis em desenvolvimento de tecnologia, em países emergentes e desenvolvidos, 2017



Fonte: Página do REN21- Renewables Global Status Report.

1.5 Objetivos do trabalho

- O objetivo geral do trabalho é implementar uma modelagem computacional de um sistema de geração fotovoltaica trifásica ligado à rede, assim como, abordar o funcionamento de todos os equipamentos instalados nesse sistema, com enfoque maior ao inversor e seus controles além de, discutir amplamente seus resultados;
- Empregar o *software MatLab/Simulink* para a modelagem computacional e realizar nele o estudo da energia gerada e injetada na rede, a fim de garantir uma melhor estabilidade de conexão à rede, e uma baixa geração de harmônicos;
- Garantir a qualidade da energia elétrica com uma melhor eficiência na geração de energia, na qual tanto o consumidor quanto a concessionária se beneficiem.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Considerações iniciais

O diagrama resumido de um sistema fotovoltaico é composto por painel fotovoltaico (FV), conversor CC-CC, barramento CC, inversor trifásico do tipo VSI (*voltage source inverter*) e o filtro de interface que acopla todas essas unidades a rede, como pode ser visto na Figura 2.

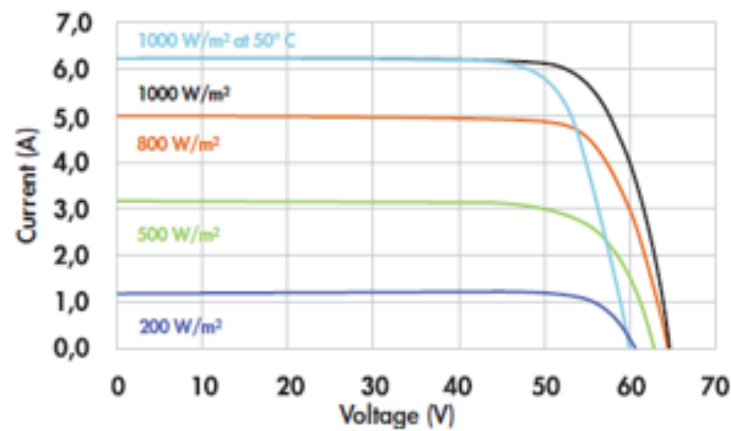
O capítulo 2 vai procurar detalhar o funcionamento de cada etapa que compõe o sistema fotovoltaico, até a sua conexão à rede. Desta forma, será necessário o detalhamento dos conversores empregados, bem como os tipos de controles e filtros instalados.

2.2 Painel fotovoltaico

O painel fotovoltaico realiza a conversão direta da energia solar em eletricidade. As células solares fotovoltaicas são elementos fundamentais para geração de energia, as quais quando agrupadas, formam o módulo fotovoltaico, que por sua vez, o conjunto destas ligadas em série ou em paralela, resultará no arranjo fotovoltaico ou, comumente conhecido por painel fotovoltaico. Assim, o mesmo pode ser conectado à rede por intermédio de conversores eletrônicos e um filtro de acoplamento seja do tipo L, LC ou LCL.

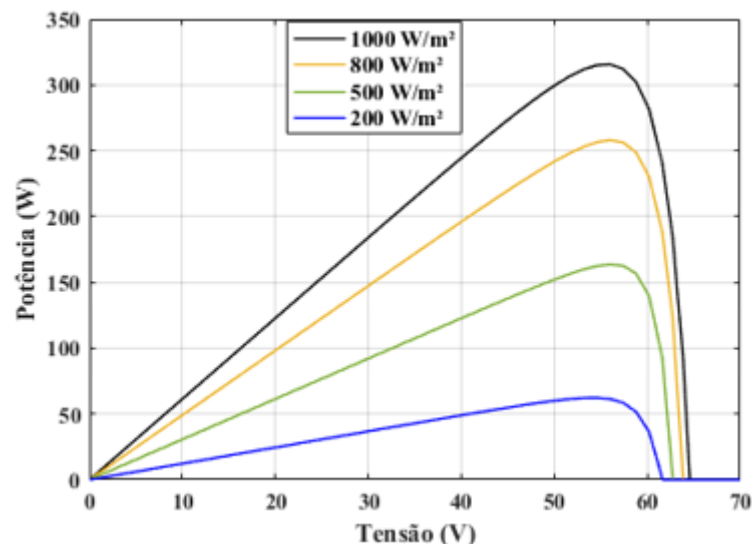
Os fabricantes dos módulos solares disponibilizam algumas informações em relação as células fotovoltaicas em formas de curvas características, as quais representam o comportamento de operação do módulo para determinados valores de irradiância e temperatura. A partir destas curvas são definidos os parâmetros de qualidade e desempenho dos módulos que podem ser úteis para estabelecer os valores de dimensionamento do arranjo fotovoltaico. Vale ressaltar também alguns aspectos associados a fatores externos que afetam suas características. Neste momento, será detalhado como a irradiância e temperatura influenciam as curvas I-V e P-V dos painéis (Souza, 2016).

A seguir, as curvas I-V (Corrente-Tensão) do modelo fotovoltaico SunPower SPR-315E-WHT-D, para quatro níveis de irradiância solar (1000, 800, 500 e 200 W/m²), fixadas em 25°C e uma curva de 1000 W/m² em 50°C.

Figura 5 - Curvas I -V em diferentes níveis de irradiância

Fonte: Próprio autor

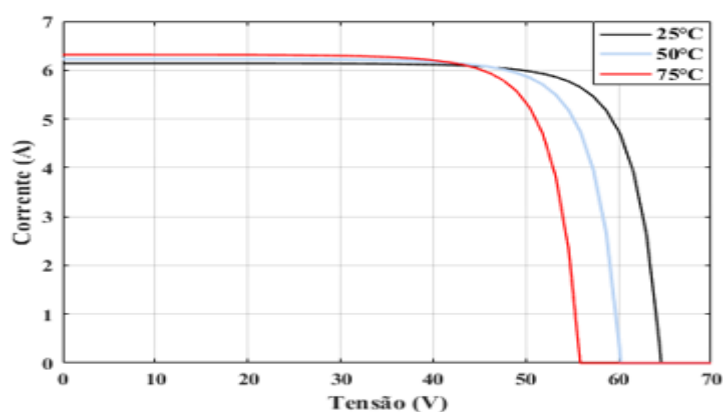
A Figura 5 mostra que a corrente do módulo fotovoltaico é fortemente influenciada pela irradiância enquanto a tensão sofre pouca influência desse fator. Vale ressaltar que a curva em azul claro é a única fixada na temperatura de 50°C, enquanto as outras são em 25°C, sendo assim, percebe-se que para altas temperaturas a tensão de operação tem seu valor reduzido de forma bastante significativo, enquanto a corrente tem um leve aumento. A Figura 6 apresenta as curvas P -V (Potência-Tensão) para os quatros níveis de irradiância, com a temperatura fixa em 25°C.

Figura 6 - Curva P -V em diferentes níveis de irradiância

Fonte: próprio autor

Percebe-se na Figura 6 que a potência gerada reduz com a diminuição da irradiância, em outras palavras, sua eficiência é consideravelmente prejudicada. Já na Figura 7, a irradiância solar está fixada em 1000W/m^2 com variação da temperatura em 25° , 50° e 75°C . Nesta Figura, observa-se nitidamente que a variação da temperatura interfere pouco na corrente, enquanto a tensão tem seu valor significativamente reduzido.

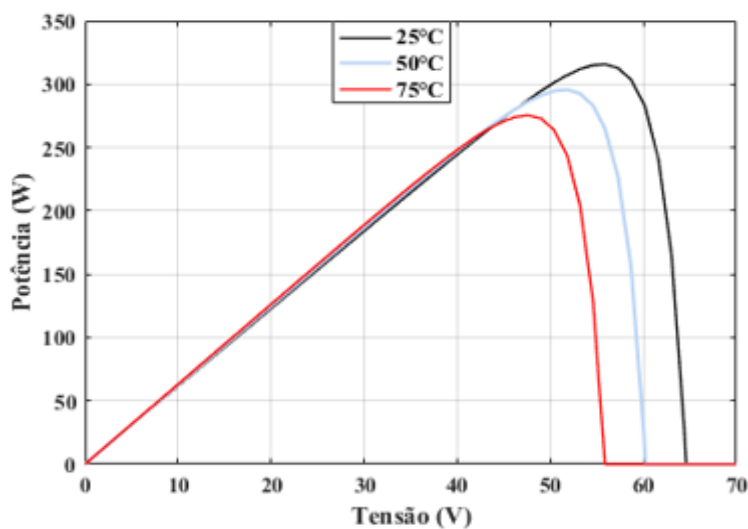
Figura 7 - Curvas I -V em três diferentes temperaturas



Fonte: Próprio autor

A Figura 8 apresenta as curvas P-V para as três temperaturas distintas com a irradiância fixa em 1000W/m^2 . Observa-se que com o aumento da temperatura a potência fornecida pelo módulo é reduzida consideravelmente, pois vale lembrar que, as células fotovoltaicas são constituídas por semicondutores.

Figura 8 - Curvas P -V em três diferentes temperaturas

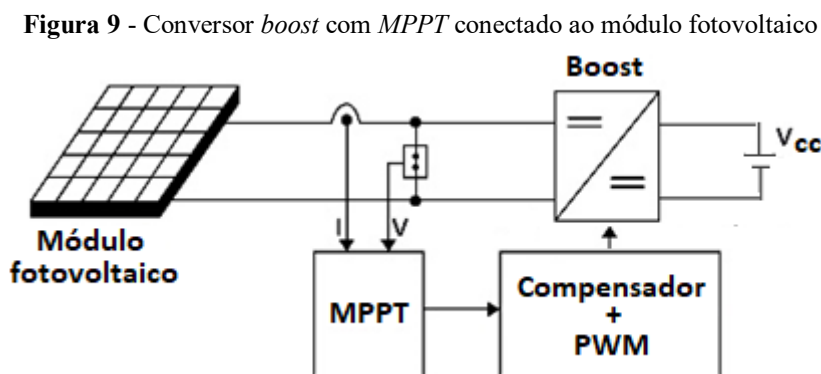


Fonte: Próprio autor

2.3 Conversor elevador de tensão (*Boost*)

O conversor CC-CC presente no sistema fotovoltaico é do tipo *boost*, sendo assim, permite elevar a tensão da saída do arranjo Fotovoltaico para um valor próximo ao exigido pelo inversor, com a finalidade de garantir um bom funcionamento do mesmo. Como pretende-se que os painéis trabalhem no ponto de máxima potência (MPP), torna-se necessário um algoritmo de controle para aplicar os pulsos do chaveamento do *boost*. Tal algoritmo de controle é conhecido por *MPPT* (*Maximum power point tracking*), em português, rastreamento do ponto de máxima potência.

Vale ressaltar que, existem vários métodos de MPPT na literatura com o propósito de garantir que os painéis fotovoltaicos operem no seu potencial máximo para uma determinada situação de irradiância e temperatura. A Figura 9 mostra o esquema do conversor *boost* conectado na saída de um módulo fotovoltaico.



Fonte: (Souza, 2016)

Basicamente, para a realização do *MPPT* é necessário realizar a leitura de tensão e corrente na saída do arranjo fotovoltaico, o qual será melhor explanado na seção seguinte.

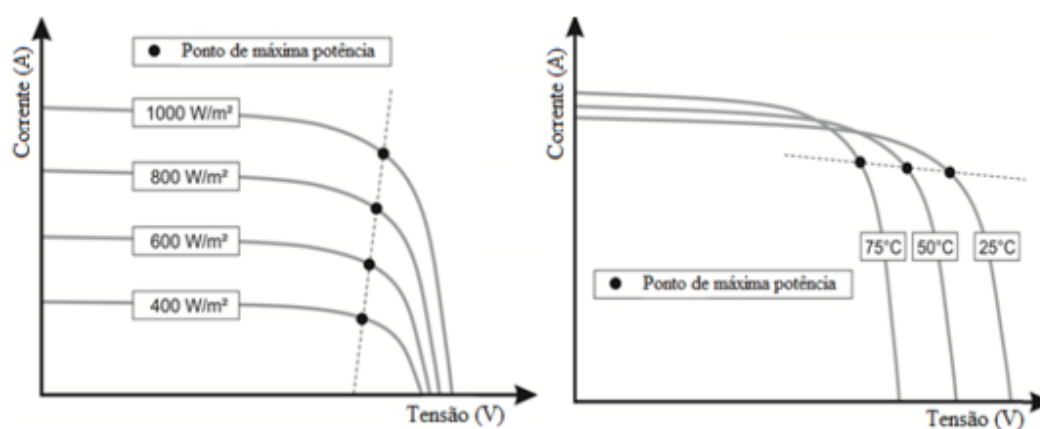
2.4 Ponto de máxima potência (MPP)

O arranjo fotovoltaico pode fornecer diferentes potências ao longo do dia, isso ocorre devido ao painel FV estar sujeito a diferentes condições meteorológicas, como sombreamento parcial ou total, insolação, nascer e pôr do sol. Esses aspectos mudam o ponto de operação do sistema, portanto, as curvas características de corrente e tensão sofrem alterações que influenciam no ponto de máxima potência (Cupertino, 2015). Assim, é necessário rastrear o

ponto de máxima potência naquele instante para obter o máximo rendimento em todas as situações práticas.

A variação da irradiância sobre o painel traz maior influência sobre a corrente, enquanto que, a variação na temperatura traz maior influência sobre a tensão do painel como pode ser visto na Figura 10. Ainda, na mesma Figura, percebe-se a linearização dos pontos de máxima potência em relação a irradiância e temperatura. Pode-se realizar uma interpolação dos pontos de máxima potência das diferentes curvas V- I (Bollen; Hassan, 2011).

Figura 10 - Linearização dos pontos de máxima potência no módulo fotovoltaico



Fonte: (Perez, 2015)

Como o módulo fotovoltaico não tem uma característica linear de tensão-corrente e a performance dos painéis se modifica com as variações do tempo, é necessário procurar meios para a realização do rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Até o momento, o número de técnicas existentes para o encontro do MPPT são 19 (Esrám; Chapman, 2007).

As técnicas mais comuns para obtenção do MPP é a utilização dos métodos *Perturb and observer* (P&O), *Hill Climbing* e *Incremental Conductance*, sendo que cada uma apresenta tanto características negativas quanto positivas (Go et al., 2011).

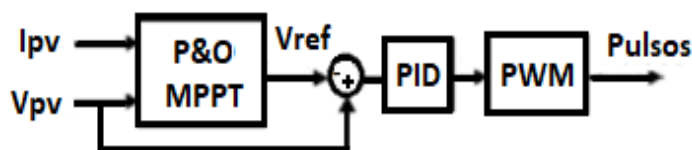
Neste trabalho o método usado é o P&O, caracterizado por ter uma estrutura simples, poucos parâmetros a medir e facilidade de complementação. O método consiste na alteração da tensão do módulo fotovoltaico até atingir a máxima potência (Sobreira et al., 2011). Tal estratégia será melhor explicada na seção seguinte.

2.5 MPPT P&O

O método P&O faz incremento e decremento na tensão da saída do sistema FV, a fim de, comparar a potência de saída do sistema FV com o ciclo de perturbação anterior (P_{atual} com $P_{anterior}$). Após a alteração do valor da tensão, caso a potência aumente, o controle move o ponto de operação do sistema para uma certa direção na tentativa de acertar a máxima potência, se der errado, o ponto de operação é movido na direção oposta. No próximo ciclo de perturbação o algoritmo opera do mesmo modo (Faranda et al., 2008).

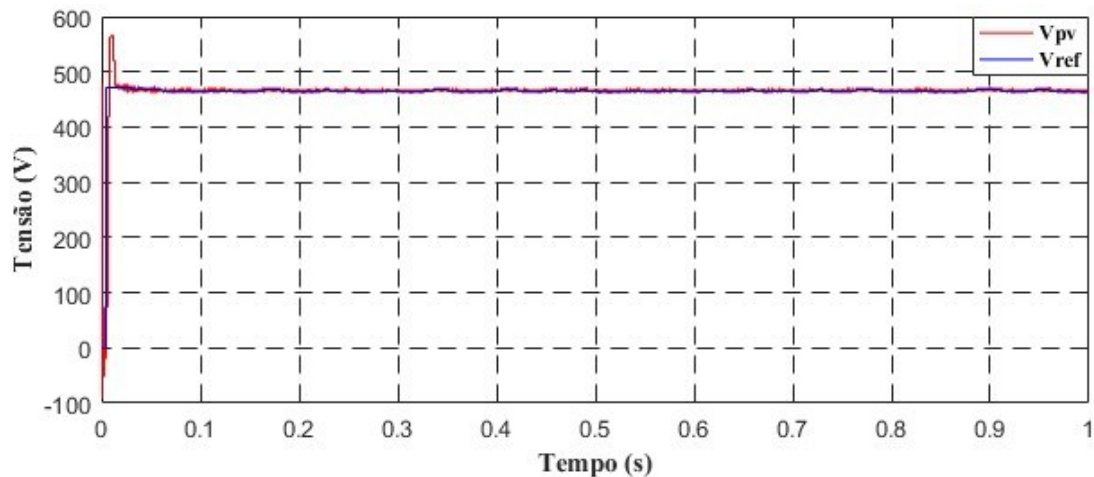
Para efetuar o controle do *MPPT*, foi realizado o sensoriamento da tensão e da corrente do arranjo fotovoltaico, como pode ser visualizado na Figura 11. A utilização do compensador é para ajustar o erro gerado entre a subtração do sinal de tensão do arranjo fotovoltaico (V_{pv}) com a tensão de referência (V_{ref}) fornecida pelo algoritmo de *MPPT P&O*.

Figura 11 - Diagrama de bloco do controle do conversor *boost*



Fonte: (Souza, 2016)

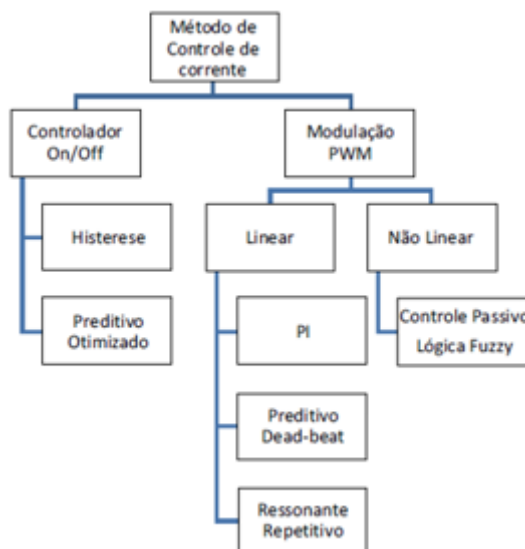
A seguir na Figura 12, é mostrado de forma detalhada a atuação do MPPT P&O em um arranjo fotovoltaico. O controle é feito para situação de temperatura de 25°C e irradiância de 1000W/m², em sua operação há a captação do sinal de tensão e corrente, e na realização do algoritmo P&O encontra-se a resposta a tensão de referência (V_{ref}), que neste caso, é o sinal resultante da tensão de entrada adicionada por uma perturbação de $\pm 0,5V$ em intervalos de 0,01s, na tentativa de rastrear o ponto de máxima potência (Souza et al., 2016). Percebe-se que a tensão de saída do arranjo fotovoltaico (V_{pv}) está acompanhando a tensão de referência (V_{ref}) gerada pelo algoritmo de MPPT P&O.

Figura 12 - Atuação do MPPT P&O no arranjo fotovoltaico

Fonte: (Souza, 2016)

2.6 Inversor e seus controles

O inversor é a terceira unidade fundamental do sistema fotovoltaico e é localizado após ao conversor *boost*. Destaca-se que, o controle da tensão do barramento CC é realizado pelo próprio inversor e não pelo conversor *boost*. A regulação de tensão do barramento CC ajuda a manter o equilíbrio da potência contínua extraída do arranjo FV, assim como, a potência alternada transmitida à rede (Yang; Blaabjerg, 2015). Já em relação ao controle de corrente no inversor, existem diferentes estratégias que podem ser tomadas, como mostra a Figura 13. (Teodorescu et al., 2011).

Figura 13 - Topologias de controle de corrente de inversor

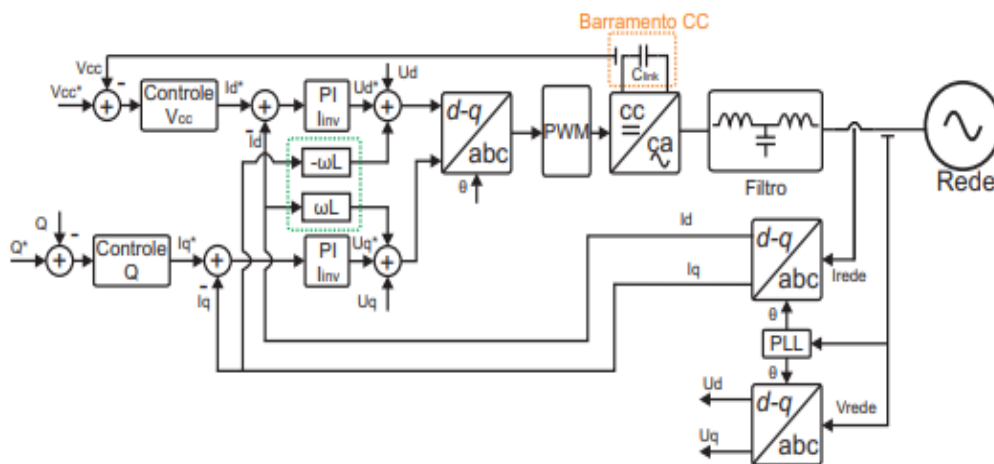
Fonte: (Teodorescu et al., 2011)

Neste trabalho, a discussão será somente sobre as estratégias de controle linear, as quais são divididas em compensadores PI (conhecido também por controle $d-q$), preditivo e ressonante (comumente conhecido por controle $\alpha-\beta$), conforme constatado na Figura 13. Vale destacar que, será dado maior enfoque ao sistema $d-q$, uma vez que, foi o controle implementado neste trabalho.

A transformação $abc-dq0$ (transformada de Park) proporciona eixos de referência que giram em sincronismo com a rede elétrica, já os sinais alternados são transformados em um sistema de sinais contínuos, facilitando assim a aplicação do controlador PI. Esta é uma estratégia amplamente utilizada e pesquisada em eletrônica de potência para controle de corrente no inversor de sistemas fotovoltaicos (Yasdani; Dash, 2009).

Também conhecido como SRFC (*Synchronous Reference Frame Control*) para sistemas trifásicos, esse controle apresenta como principal desvantagem uma dinâmica lenta e o acoplamento em eixos diretos e em quadratura (Blaabjerg et al., 2006). Para melhorar o desempenho do sistema, normalmente é aplicada a compensação *feedforward* de tensão e a realimentação de estados (correntes no indutor com ganho ωL) conforme exhibe à Figura 14.

Figura 14 - Controle no sistema $d-q$



Fonte: (Teodorescu et al., 2011)

No diagrama acima é possível notar a presença de um PLL (*phase locked loop*), que consiste em um algoritmo para a detecção do ângulo de fase da rede, além da sua frequência e tensão. Enquanto esses dois últimos elementos citados são fundamentais para monitorar as condições da rede e para o cumprimento dos requisitos de controle, o ângulo de fase é importante para as transformações do quadro de referência (Souza; Junior et al., 2018).

Outra estratégia de controle linear possível de ser implementada ao inversor trifásico, pode-se citar o compensador ressonante, no qual as correntes são transformadas em um quadro de eixos de referência estacionário (*Stationary Reference Frame Control*), que trabalha com as variáveis $\alpha\text{-}\beta$ (transformada de Clark). Nesse caso, o termo ressonante funciona como um integrador para sinais senoidais, em sua composição existe um filtro passa-faixa de segunda ordem sintonizado na frequência da rede elétrica (Souza; Borges et al., 2018)

2.7 Controlador PI e sua função transferência

Neste trabalho é importante entender o funcionamento do controlador PI e, para melhor ajustar seus ganhos, sendo tem-se a necessidade de apresentar sua função transferência, que serve para especificar seu ganho no domínio da frequência, que pode ser chamado de $G_c(s)$ (Sujoldizic; Watkins, 2006).

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p * s + K_i}{s} \quad (2.1)$$

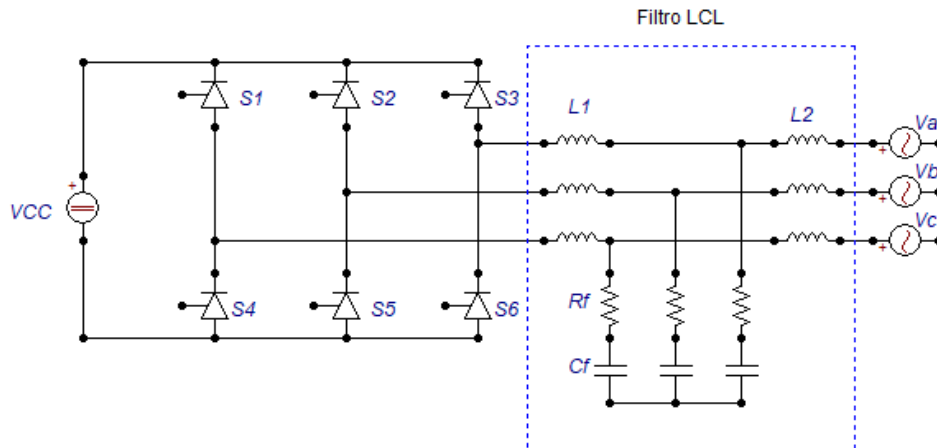
Onde K_p é o ganho proporcional, K_i o ganho integral e s a frequência da rede.

2.8 Filtro LCL

Os filtros de acoplamentos são elementos muito importante em sistemas fotovoltaicos, eles ficam localizados depois dos inversores tipo fonte de tensão (VSI), cuja função é obter uma atenuação satisfatória das ondulações de comutação, presente na conexão entre o SFV e a rede elétrica (Usluer; Hava, 2014).

Em sistemas trifásicos a utilização do filtro LCL é uma das mais comuns, este componente obtém um melhor efeito de filtragem de harmônicos ao usar-se uma menor indutância de filtro (Xin-Li et al., 2011).

Comparando o filtro L com o LCL, pode-se notar várias vantagens do segundo em relação ao primeiro, pois além do filtro LCL possuir maior atenuação das frequências harmônicas consumindo menor potência reativa na frequência fundamental, ele também apresenta um tamanho inferior ao filtro L reduzindo assim custos e perdas de operação (Dannehl et al., 2007). A seguir apresenta-se a Figura 15 representando este filtro.

Figura 15 - Inversor trifásico conectado à rede com filtro LCL

Fonte: Próprio autor

No tocante a filtros de acoplamentos, deve-se ficar atento sobre sua frequência de ressonância, pois nesta condição o filtro apresenta um valor de impedância nulo, acarretando em uma elevada corrente de curto-circuito, mas como a rede elétrica apresenta elementos resistivos, os mesmos amortecem o valor do curto (Blaabjerg et al., 2003). A frequência de ressonância é dada por (2.2).

$$F_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}} \quad (2.2)$$

Para prevenir que a ressonância do filtro torne um problema, são utilizadas técnicas de amortecimento ativo e passivo. Nesse caso foi utilizado o passivo, pois foi acrescentado ao circuito um resistor R_f em série com o capacitor de filtro C_f para reduzir as oscilações sub-amortecidas. Assim, o valor de R_f deve ser bem selecionado para não ocorrer muitas perdas pelo resistor de amortecimento (Zhang et al., 2012).

3 ESTUDO COMPUTACIONAL DA MODELAGEM DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE VIA PLATAFORMA *MATLAB/SIMULINK*

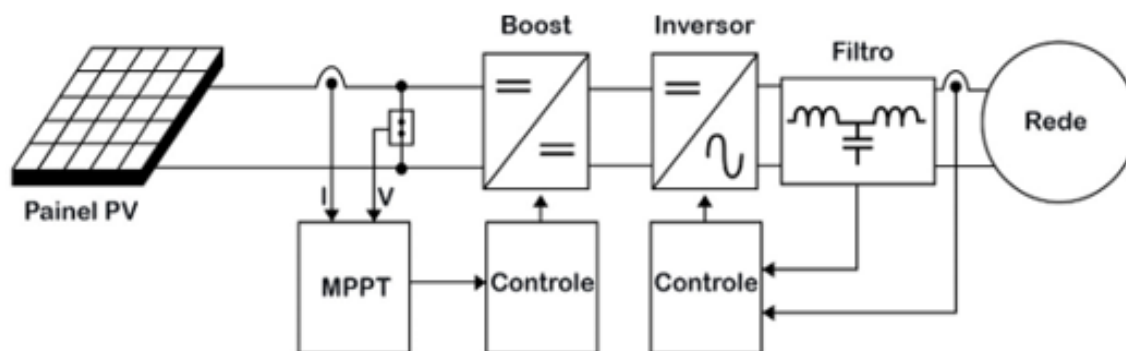
3.1 Considerações iniciais

O objetivo principal deste capítulo é mostrar a implementação dos elementos de controle de um sistema fotovoltaico, desde o conversor *Boost* até os filtros LCL, na plataforma computacional do *Matlab/Simulink*. Também será feito a modelagem matemática de alguns desses elementos afim de, parametrizar seus valores para realizar um melhor estudo de caso.

Quanto à implementação do inversor na plataforma computacional, vale ressaltar que o controle empregado é o sistema d-q. A sua apresentação neste capítulo esclarece de forma mais simples como funciona sua estratégia de controle.

A Figura 16 apresenta o diagrama esquemático do sistema fotovoltaico conectado à rede, que vai ser todo implementado no *Matlab/Simulink*, conforme será visto nos próximos subcapítulos.

Figura 16 - Diagrama de bloco do sistema fotovoltaico



Fonte: (Souza, 2016)

3.2 Parametrização do painel fotovoltaico

O arranjo fotovoltaico é composto por três fileiras (*strings*) em paralelo, com 13 módulos série em cada, ou seja, um sistema fotovoltaico formado por 39 módulos. A Tabela 1 retrata as informações de entrada do módulo American Solar ASW-260M e do seu respectivo arranjo.

Tabela 1 - Parametrização do módulo AMERICAN SOLAR ASW-260M

	Dados do Módulo	Dados do Arranjo
V _{mp}	36,1 V	469,3 V
V _{oc}	43,42 V	564,5 V
I _{mp}	7,18 A	21,54 A
I _{sc}	7,98 A	23,94 A
P _{máx}	260 W	10,108 kW
R _s	0,4 Ω	1,9 Ω
α	0,004 % / °C	0,012% / °C
β	-0,152% / °C	-1,976% / °C

Na Tabela 1, V_{mp} consiste na tensão de máxima potência, V_{oc} representa a tensão de circuito aberto; I_{mp} trata-se da corrente de máxima potência, I_{sc} refere-se à corrente de curto-circuito; α define o coeficiente de temperatura para a corrente de curto-circuito; β expressa o coeficiente de temperatura para a tensão de circuito em malha aberta, R_s informa a resistência série da célula e P_{max} a potência máxima fornecida pelo arranjo fotovoltaico. Uma observação a ser feita é que o R_s foi encontrado através de um software gratuito cujo nome é “PV analysator”, apresentando como parâmetros exigidos o V_{mp}, V_{oc}, I_{mp}, I_{sc}, números de módulos série e paralelo.

3.3 Apresentação do conversor boost no *Matlab/Simulink*

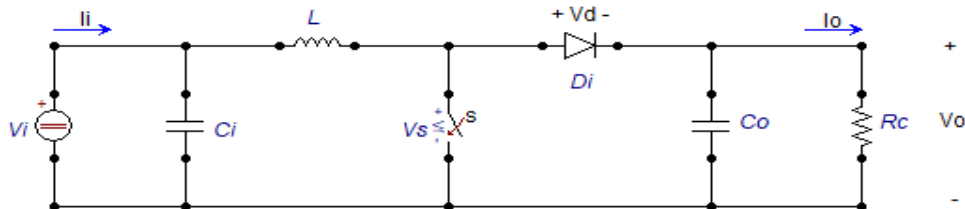
O conversor *boost* é projetado para a condição de saída da tensão do módulo fotovoltaico. A tensão de saída do *boost* será considerada em torno de 600V (tensão de entrada do inversor). Enquanto a tensão de entrada do *boost* será a soma das tensões de máxima potência dos 13 módulos conectados em série, equivalente a 469,3 V. A Tabela 2 mostra as variáveis utilizadas para a parametrização do conversor *boost*.

Tabela 2 - Parametrização do conversor *Boost*

Parâmetros	Valor
L _{boost}	949,203 uH
C _i	100 uF
C _o	1300 uF

Comumente não é da topologia do conversor *boost* possuir um capacitor em sua entrada, mas, com o intuito de diminuir os *ripples* de tensão na entrada do conversor, coloca-se um capacitor antes do indutor conforme indica a Figura 17.

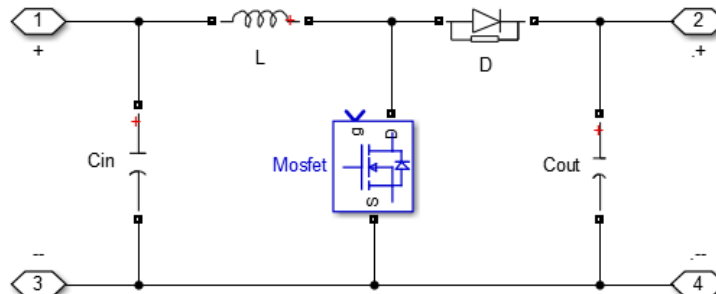
Figura 17 - Circuito equivalente do conversor *Boost*



Fonte: Próprio autor

O conversor *boost* foi implementado no *Matlab/Simulink* a partir da utilização dos seguintes elementos discretos: capacitores de entrada e saída; indutor e chave *MOSFET*. A Figura 18 ilustra a implementação do conversor *boost* realizada no *Simulink*.

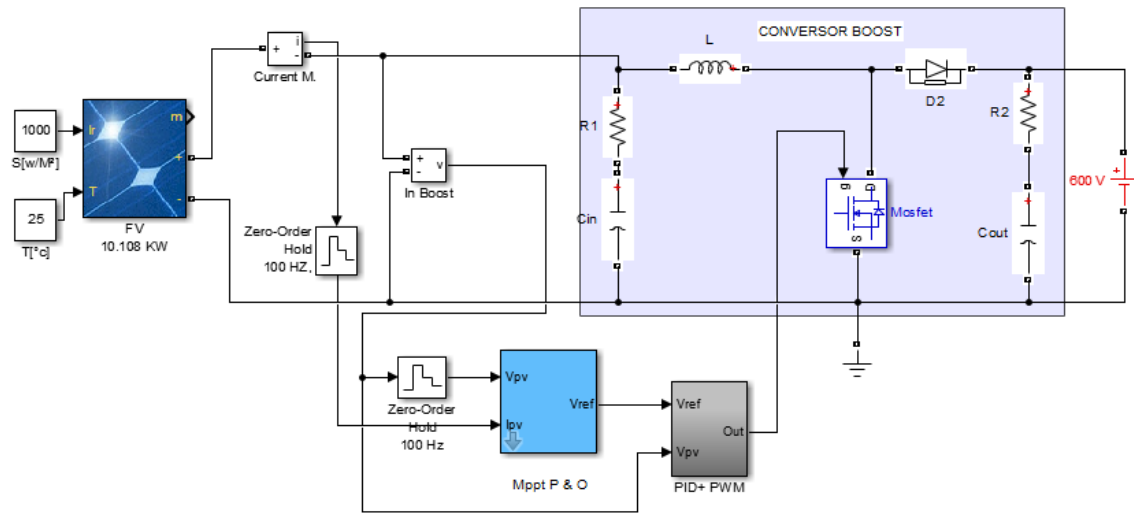
Figura 18 - Conversor *Boost* elaborado no *Simulink*.



Fonte: (Souza, 2016)

Para a efetivação do controle do *MPPT* é feito o sensoramento da tensão e da corrente dos painéis fotovoltaicos que estão conectados ao conversor *CC-CC boost*, conforme ilustra a Figura 19. Precisa-se de uma fonte de tensão de 600 V na saída do *boost* para limitar a tensão de saída neste patamar, porque o responsável em controlar este valor no barramento *CC* é o inversor fotovoltaico (malha de tensão). Assim, o conversor *boost* vai controlar somente a tensão de saída do arranjo fotovoltaico, fazendo assim com que o arranjo trabalhe no ponto de máxima potência.

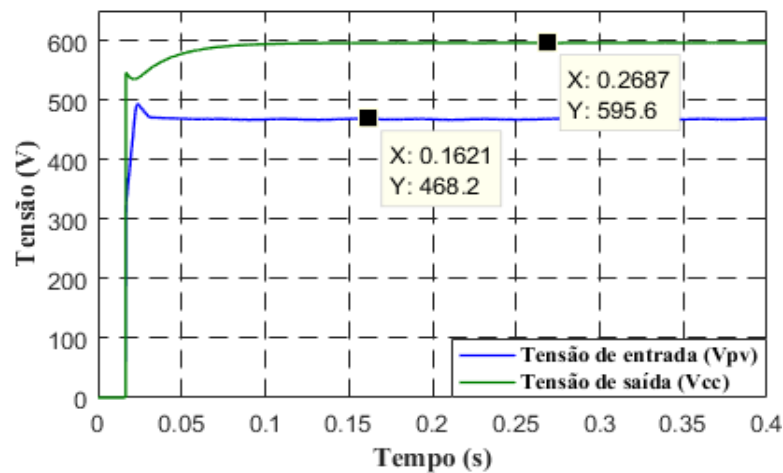
Figura 19 - Sistema fotovoltaico com *Boost* e MPPT implementado



Fonte: Próprio autor

Para encerrar a etapa dos resultados do módulo fotovoltaico conectado ao conversor *boost*, a Figura 20 ilustra a tensão de entrada e saída do conversor *boost*, onde trocou-se a fonte de tensão de 600V por uma carga, a qual será responsável por drenar toda potência do arranjo fotovoltaico. Como a potência do arranjo FV corresponde a 10,108 kW com a tensão do projeto do barramento CC em 600 V, o valor da carga nesse caso será de 35,612 ohms.

Figura 20 - Tensão na entrada e saída do conversor *Boost*



Fonte: (Souza, 2016)

Ressalva-se que a tensão de saída não se estabilizou em 600 V, pois tal função fica a cargo do controle da malha de tensão do inversor fotovoltaico. A Tabela 3 exibe a parametrização do conversor *boost*.

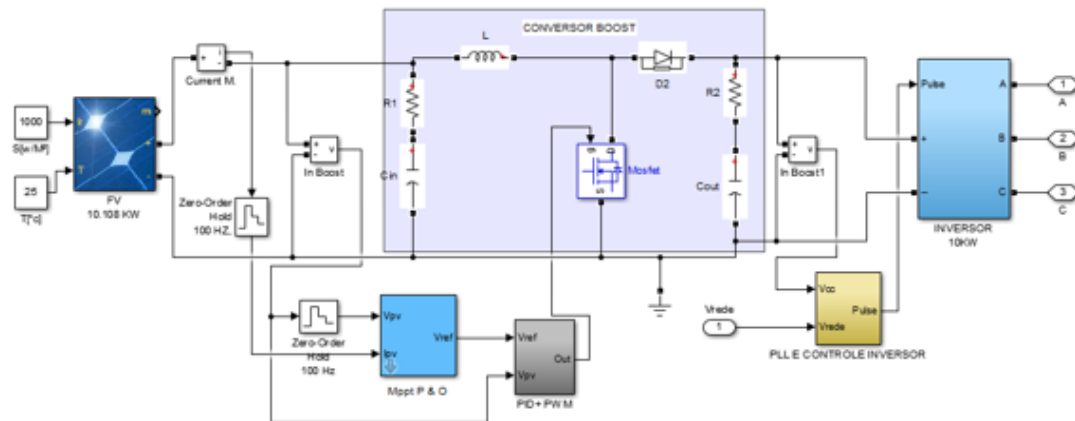
Tabela 3 - Parametrização do conversor *Boost*

Parâmetros	Valor
V_{entrada}	469,3 V
$V_{\text{saída}}$	600 V
L_{boost}	949,203 μH
C_i	100 μF
C_o	1300 μF
R_{carga}	86,44 Ω
η_{boost}	93%
F_{sw}	10 kHz

Na tabela anterior, C_i é a capacitância de entrada do conversor *boost*, C_o é a capacitância de saída, R_o é a resistência equivalente do inversor, η é o rendimento adotado ao conversor *boost*, P_o a potência de saída do mesmo, e por fim, F_{sw} a frequência de chaveamento. Vale ressaltar que os valores das capacitâncias de entrada e saída foram arredondados para valores inteiros.

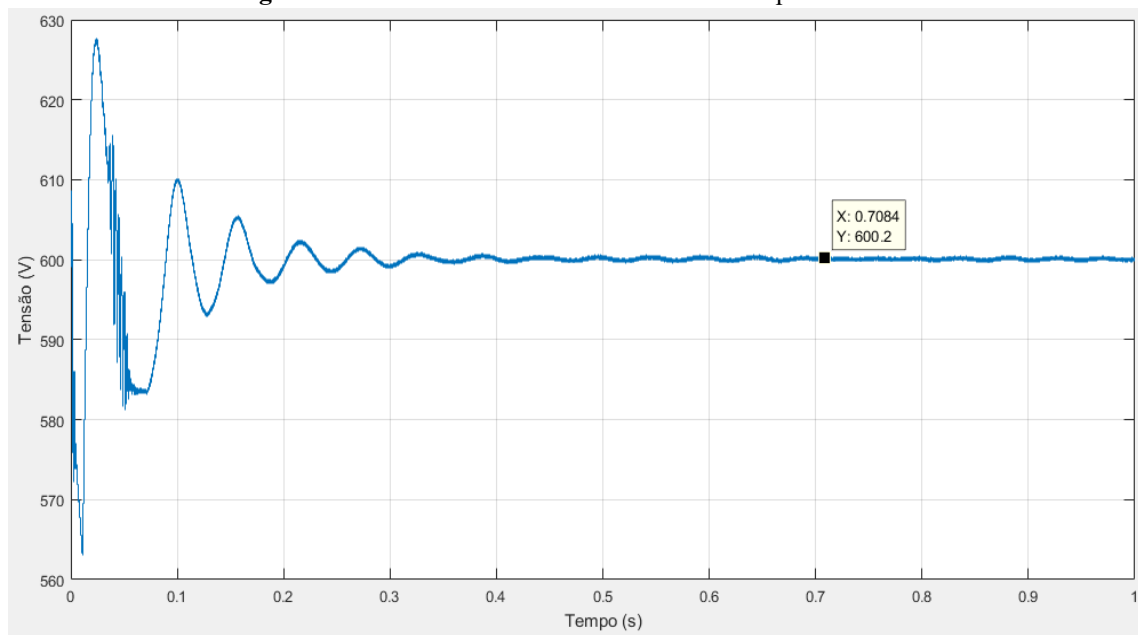
3.4 *Boost* conectado ao inversor no *Matlab/Simulink*

Depois de mostrar os painéis fotovoltaicos conectados ao *boost* com o intuito de elevar a tensão em torno dos 600 V, parte-se finalmente para a conexão deste sistema (placa-*boost*) ao inversor. Tal componente será do tipo *VSI* (*Voltage Source Inverter*), que juntamente com o PLL (*phase locked loop*) são essenciais para a conexão do sistema fotovoltaico à rede elétrica. A Figura 21 exibe a implementação na plataforma *Matlab/simulink*.

Figura 21 - Sistema fotovoltaico implementado no *Simulink*

Fonte: Próprio autor

Com o intuito de comprovar que a malha de tensão do controle implementado ao inversor é responsável por controlar a tensão do barramento CC, a Figura 22 ilustra a tensão do barramento CC em 600,2 V, correspondendo assim, a tensão de referência do projeto adotado.

Figura 22 - Tensão do barramento CC controlado pelo inversor

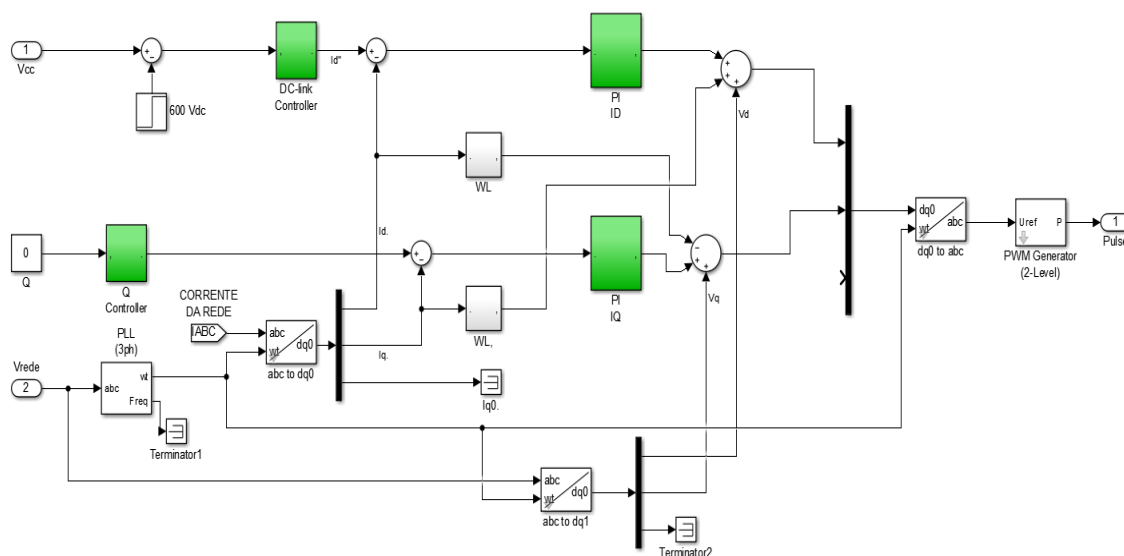
Fonte: Próprio autor

O transitório visto na figura anterior é devido à atuação do MPPT, que não começa a operar, instantaneamente, com a tensão do arranjo fotovoltaico, fato que pode ser notado na Figura 12.

A corrente de saída do inversor que é injetada na rede deve estar sincronizada com a tensão da rede, conforme exige a maioria das normas regulatórias (Hauser, 2014).

A Figura a seguir, ilustra o controle do inversor implementado no software *Matlab/Simulink*.

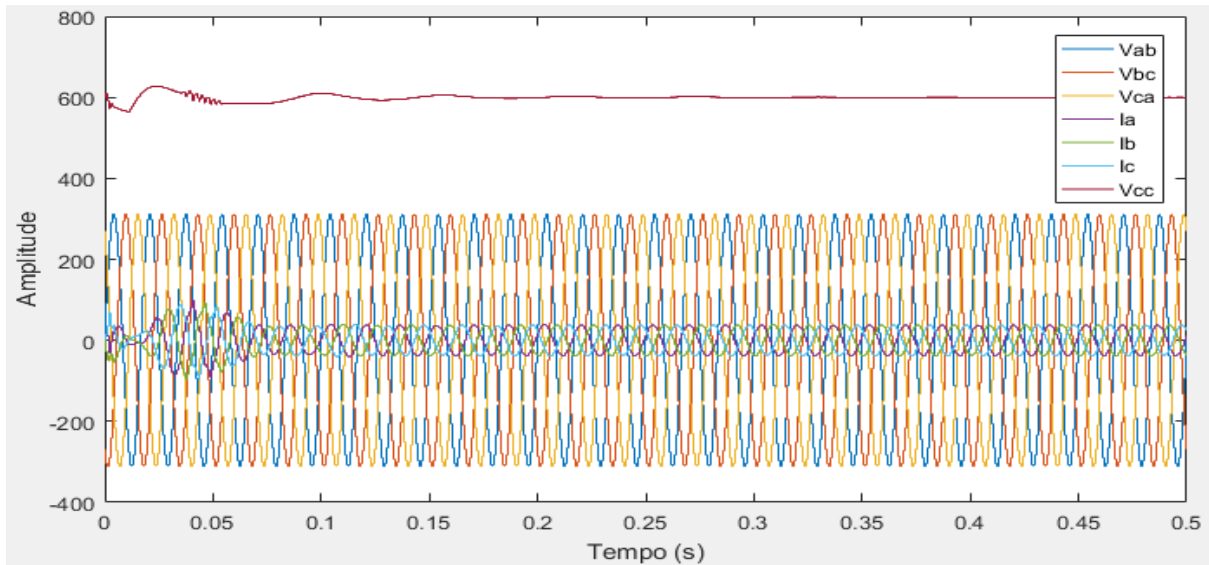
Figura 23 - Inversor implementado no Simulink



Fonte: Próprio autor

A simulação do sistema foi realizada com base em um conversor CC-CA trifásico do tipo fonte de tensão, operando com frequência de 10 kHz, com potência nominal de 10,108 kVA e conectado na rede por meio do filtro de acoplamento LCL. A estratégia de sincronismo da GDFV à rede foi por PLL (*phase-locked loop*), tendo a rede implementada como uma fonte de tensão trifásica equilibrada. A Figura 24 ilustra a tensão, corrente trifásica no ponto de acoplamento e a tensão do elo CC.

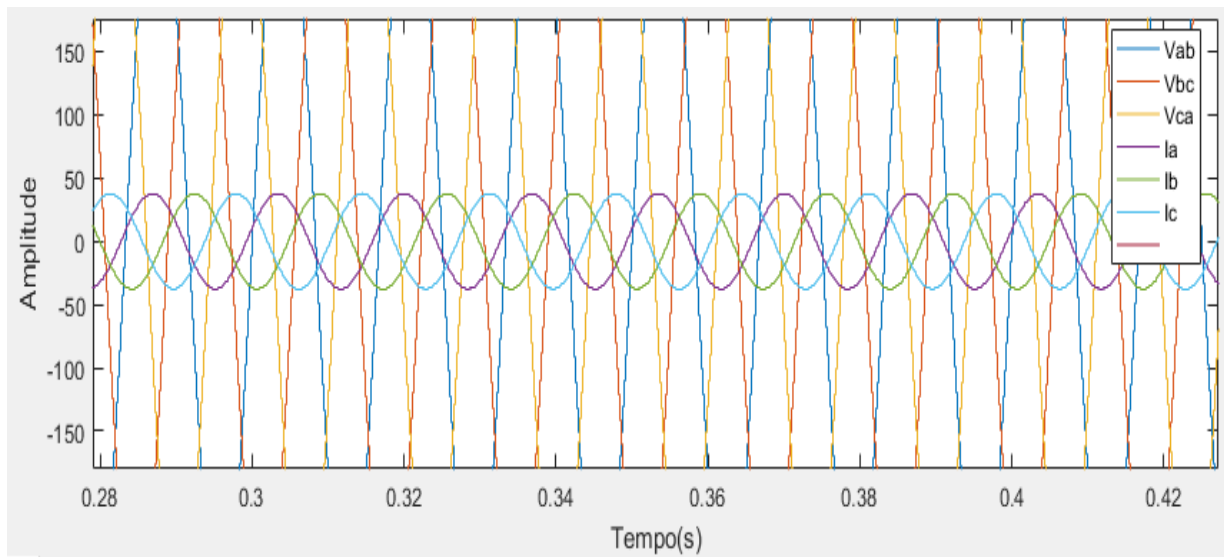
Figura 24 - Tensão e corrente no ponto de acoplamento e tensão no elo CC com o controle de corrente alternativo



Fonte: Próprio autor

Observa-se que as correntes estão sincronizadas com as tensões da rede comprovando a eficiência da malha de sincronia (PLL), assim como a tensão do barramento CC ter sido estabilizada em 600 V (tensão de referência), comprovando assim, a eficiência da malha de tensão do controle do inversor. A Figura 25 apresenta-se a tensão sincronizada com a corrente de forma mais nítida.

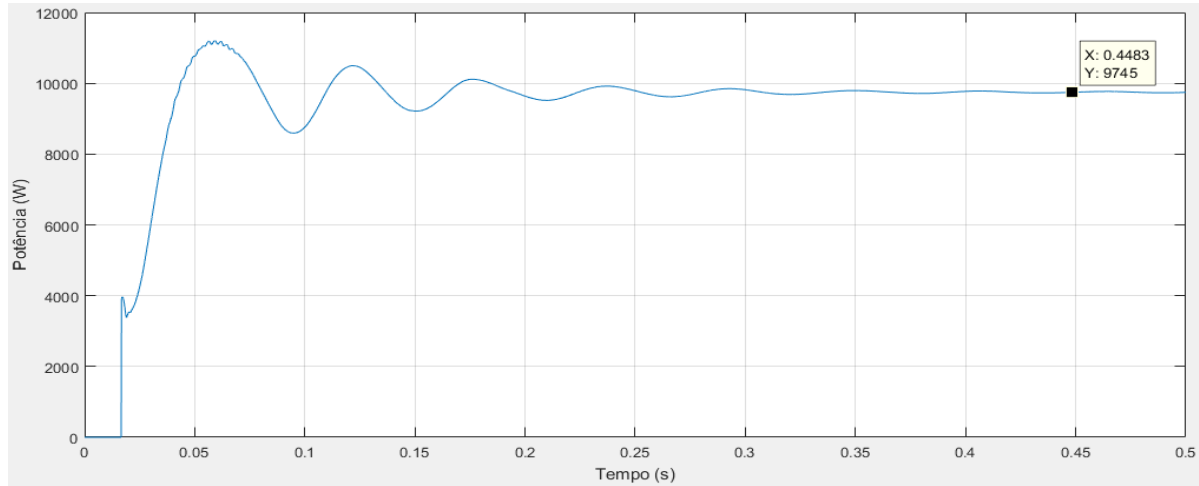
Figura 25 - Tensão e corrente no ponto de acoplamento com sincronismo completo



Fonte: Próprio autor

Já a potência ativa entregue a rede foi de 9745 W, destacando assim um rendimento de 96,41%, como pode-se ver na Figura 26 a seguir

Figura 26 - Potência ativa entregue à rede pelo inversor



Fonte: Próprio autor

A Figura 27 apresenta o controlador PI usado nessa simulação com sua seguinte função transferência.

Figura 27 - controlador PI do inversor implementado no Simulink



Fonte: Próprio autor

3.5 Implementação do filtro LCL no Matlab/Simulink

Antes de mostrar a implementação do filtro LCL no Matlab/Simulink há a necessidade de mostrar alguns parâmetros usados na configuração do filtro LCL: V_L (tensão de linha), P_n (potência ativa de saída do inversor), ω_g (frequência angular da rede), V_{CC} (tensão do barramento CC) e F_{sw} (frequência de chaveamento do inversor) (Reznick et al., 2014). A impedância de base (Z_b) e a capacitância de base (C_b) são definidas pelas equações (3.1) e (3.2). Assim, os valores de filtro serão referidos numa percentagem dos valores de base:

$$Z_b = \frac{V_L^2}{P_n} \quad (3.1)$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_g \cdot Z_b} \quad (3.2)$$

Para a parametrização da capacitância do filtro, considera-se que a variação máxima do fator de potência observada pela rede elétrica seja de 5% (Reznick et al., 2014) (Liserre et al., 2005), indicando que a capacitância base do sistema é ajustada pela expressão (3.3).

$$C_f = 0,05 \cdot C_b \quad (3.3)$$

Um fator de projeto maior que 5% pode ser usado quando precisar compensar a reatância indutiva do filtro, porém o fator de potência será comprometido. Por outro lado, se um valor muito baixo de capacitância for selecionado, um valor de indutância muito alto pode ser necessário (L_l). Portanto, é aconselhável atribuir um valor em torno da metade do limite obtido em (3.3), caso não se respeite a restrição da frequência de ressonância referente a equação (3.8), deve-se aumentar a capacitância até o valor limite (Liserre et al., 2005). Para este trabalho admitiu-se 3% da capacitância base ($0,03 \cdot C_b$). A corrente máxima de saída do inversor trifásico é obtida através de (3.4).

$$I_{max} = \frac{P_n \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot V_L} \quad (3.4)$$

A ondulação de corrente máxima na saída do inversor, normalmente admitida em projeto, corresponde a um valor de 10% da corrente máxima, conforme exibe em (3.5).

$$\Delta I_{max} = 0,1 \cdot I_{max} \quad (3.5)$$

Vale ressaltar que para esse trabalho adotou-se uma ondulação de corrente em 8% ($0,05 \cdot I_{max}$). Dessa forma, o valor do indutor do lado do inversor é expresso em (3.6).

$$L_1 = \frac{V_{CC}}{6 \cdot F_{sw} \cdot \Delta I_{max}} \quad (3.6)$$

O filtro LCL deve reduzir a ondulação da corrente a 20% (Reznick et al., 2014) (Liserre et al., 2005). Os autores propõem um fator de atenuação de corrente harmônica ka , sugerindo um valor de 20% em seus exemplos. Dessa forma, a indutância do lado da rede (L_2) é dada em (3.7).

$$L_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{k_a^2} + 1}}{C_f \cdot \omega_{sw}^2} \quad (3.7)$$

A frequência de ressonância (F_{res}), foi observada antes no capítulo 2 na seção (2.2), ela deve estar dentro dos limites estabelecidos em (3.8). Caso contrário, deve-se trabalhar com outro valor de capacitância obtido por (3.3).

$$10F_{rede} < F_{res} < 0,5 F_{sw} \quad (3.8)$$

Um resistor em série (R_f) com o capacitor atenua parte da ondulação na frequência de comutação para evitar a ressonância. O valor desta resistência deve ser um terço da impedância do capacitor de filtro na frequência de ressonância (Reznick et al., 2014), logo, a resistência em série com a capacitância do filtro (amortecimento passivo) é dada em (3.9).

$$R_f = \frac{1}{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_{res}) \cdot C_f} \quad (3.9)$$

A inserção do resistor em série com o capacitor do filtro contribui com perdas adicionais, contudo são perdas não muito significativas, importante lembrar, por exemplo, que o resistor coopera na redução da ondulação da corrente em 20% (Liserre et al., 2005). Assim, utilizando os valores presentes na Tabela 4, obtém-se os componentes do filtro LCL – apresentados na Tabela 5.

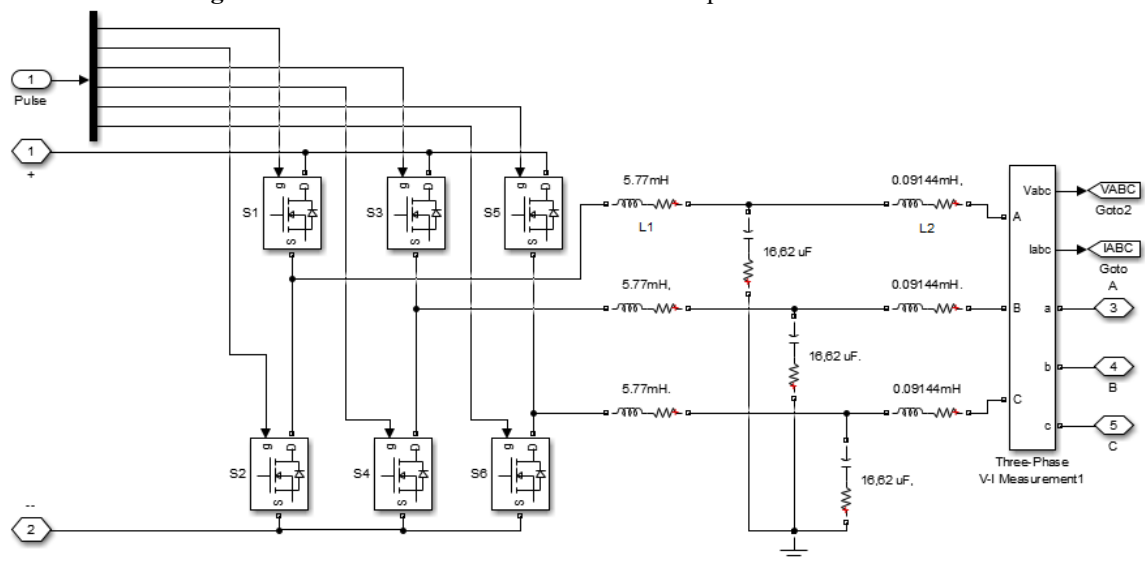
Tabela 4 - Parâmetros necessários para o cálculo do filtro LCL

Parâmetros	Valor
V_{CC}	600 V
V_L	220 V
Z_b	4,7879 Ω
ω_g	377 rad /s
C_b	554,0 μF
F_{sw}	10 kHz
K_a	0,2
I_{max}	37,51 A

Tabela 5 - Parametrização do filtro LCL

Parâmetros	Valor
L_1	5,33 mH
C_f	16,62 μF
L_2	0,0914 mH
R_f	0,7752 Ω
F_{res}	4117,35 Hz

O amortecimento passivo não pode ser muito baixo porque precisa evitar oscilação, e ao mesmo tempo não deve ser muito alto para não reduzir a eficiência do filtro (Wu; Lehn, 2006). O valor das resistências de L_1 e L_2 foi atribuído em 0,5 ohm. Em relação aos filtros, na atualidade é necessário o uso de filtros de alta ordem para conseguir uma atenuação suficiente das frequências de comutação. Nestes casos o uso de amortecimento passivo ou ativo são indispensáveis para garantir a estabilidade do sistema. A Figura 28 apresenta o inversor trifásico e o Filtro LCL implementado na plataforma *Simulink/Matlab*.

Figura 28 - Inversor trifásico com filtro LCL implementado no Simulink

Fonte: Próprio autor

4 CONCLUSÃO

Foram feitas várias simulações na plataforma *Matlab/Simulink* variando os valores dos ganhos K_p e K_i do controlador PI, com o objetivo de garantir uma melhor estabilidade de conexão à rede e baixa geração de harmônicos. Como as simulações apresentadas no capítulo anterior apresentam bons resultados, o controlador PI referenciado nele contém um desempenho positivo e satisfatório.

No trabalho foi possível entender a importância da simulação, já que ela permitiu avaliar hipóteses sem a necessidade de implementá-las no mundo real. Logo, simulações bem-sucedidas propiciam projetos mais seguros e eficientes. Contudo, ainda há exemplos de situações importantes que não foram estudadas neste trabalho, como placas solares passarem por períodos de sombreamento, ou seja, a irradiação não permanece constante.

É importante destacar também a plataforma *Matlab/Simulink*, pois ao atender bem as expectativas desse trabalho, ela tornou-se um exemplo de que bons pacotes de *softwares* podem ser encontrados no mercado, vale ressaltar ainda suas inúmeras aplicações em lidar com desafios da engenharia.

Quanto à questão de geração de energia fotovoltaica, notou-se que ainda há pouco investimentos nela dentro do território brasileiro, e este trabalho veio para mostrar a importância dela para a sociedade atual, estudos sobre essa forma de geração de energia tornam-se primordiais para facilitar e otimizar seu uso, criando um futuro mais sustentável.

5 REFERÊNCIAS

“Atlas Brasileiro de Energia Solar”, 2ª Edição, São José dos Campos/SP, 2017. [online]
Available: http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf [Acesso em 2 de novembro de 2018].

Blaabjerg, F.; Chiarantoni, E.; Dell’Aquila, A.; Liserre, M.; Vergura, S.; **“Analysis of the grid side behavior of a LCL filter based three-phase active rectifier”**, 2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.03TH8692), ISBN 0-7803-7912-8, Jun. 2003.

Blaabjerg, F.; Teodorescu, R.; Liserre, M.; Timbus, A. V.; **“Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems”**, IEEE - Transactions on Industrial Electronics, v. 53, n. 5, pp. 1398-1409, Out. 2006.

Bollen, M. H.; Hassan, F.; **“Integration of distributed generation in the power system”**, John Wiley & sons. ISBN 111802902X, 2011.

Chiu, H. J.; Lo, Y. K.; Yang, C. Y.; Cheng, S. J.; Huang, C. M.; Chuang, C. C.; Kuo, M. C.; Huang, Y. M.; Jean, Y. B.; Huang, Y. C.; **“A module-integrated isolated solar microinverter”**, IEEE - Transactions on Industrial Electronics, v. 60, n. 2, pp. 781-788, Fev. 2013.

Cupertino, A. F.; **“Desenvolvimento de um Simulador de Módulos Fotovoltaicos para Testes de Conversores Estáticos”**, em Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2015.

Dannehl, J.; Fuchs, F. W.; Hansen, S.; **“PWM Rectifier with LCL-Filter using different Current Control Structures”**, 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, ISBN 978-92-75815-10-8, Set. 2007.

Esrām, T.; Chapman, P. L.; **“Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques”**, IEEE - Trans Energy Conversion, v. 22, n. 2, pp. 439-449, Mai. 2007.

Faranda, R.; Leva, S.; Maugeri, V.; **“MPPT techniques for PV Systems: Energetic and cost comparison”**, IEEE - Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Print ISSN 1932-5517, Jul. 2008.

Go, S. I.; Ahn, S. J.; Choi, J. H.; Jung, W. W.; Yun, S. Y.; Song, I. K.; **“Simulation and analysis of existing MPPT control methods in a PV generation system”**, Journal of International Council on Electrical Engineering, v. 1, n. 4, pp. 446-451, Set. 2011.

Hauser, D; **“Controle de um Sistema Fotovoltaico Trifásico Conectado à Rede Elétrica”**, em Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, Ago. 2014.

Kjaer, S. B.; Pedersen, J. K.; Blaabjerg, F.; **“A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules”**, IEEE - Transactions on Industrial Applications, v. 41, n. 5, pp. 1292-1306, Out. 2005

Liserre, M.; Blaabjerg, F.; Hansen, S.; **“Design and control of an LCL filter- based threephase active rectifier”**, IEEE - transactions on industry applications, Vol. 41, Nº 5, pp. 1281-1291, Set. 2005.

Machado, S. J. M.; **“Uma proposta de controle com alta capacidade de rejeição harmônica para inversores monofásicos conectados à rede elétrica através de filtro LCL amortecido para sistemas de energia renovável”**, em Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina, Londrina/PR, 2016.

Ministério de Minas e Energia; **“Energia Solar no Brasil e Mundo”**, Out. 2017.

Paukner, F. L.; **“Comparação Do Controle Do Inversor Trifásico Conectado À Rede Com Filtro LCL Considerando o Amortecimento Passivo e Ativo”**, em Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco/PR, 2016.

Perez, F.; **“Inserção e Controle de Armazenadores de Energia em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica”**, em Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Sistemas Elétricos e Energia em parceria com o Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologias de Informação, da Universidade Federal de Itajubá, Itajubá/MG, 2015.

Reis, A.; **“Uma Contribuição para o Controle Operativo de Unidades Eólicas: Modelagem, Regulação de Tensão e Minimização das Distorções Harmônicas”**, em Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2015.

“REN21- Renewables Global Status Report”, [Online]. Available: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>. [Acesso em 3 de novembro 2018].

Reznick, A.; Simões, M. G.; Al-Dutra, A.; Mueen, S. M.; **“LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid-Interconnected Systems”**, IEEE - transactions on industry applications, v. 50, n. 2, Abr. 2014.

Sobreira, P. A.; Villalva, M. G.; Barbosa, P. G.; Braga, H. A. C.; Gazoli, J. R.; Ruppert, E.; **“Comparative analysis of current and voltage-controlled photovoltaic maximum power point tracking”**, XI Brazilian Power Electronics Conference, Set. 2011.

Souza, A. C.; Melo, F. C.; Oliveira, T. L.; Tavares, C. E.; **“Performance Analysis of the Computational Implementation of a Simplified PV Model and MPPT Algorithm”**, IEEE - Latin America Transactions, v. 14, n. 2, pp. 792-798, Fev. 2016.

Souza, A. C.; **“Análise dos Impactos da Geração Distribuída por Fonte Solar Fotovoltaica na Qualidade da Energia Elétrica”**, em Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2016.

Souza, A. C.; Borges, D. T. S.; Santos, I. N.; Macedo Jr., J. R.; **“Evaluation of Linear Current Control Methods in Single-Phase Grid-Tie Inverters”**, IEEE – Latin America Transactions, v. 16, n. 5, pp. 1424-1431, Mai. 2018.

Souza, A. C.; Junior, C. R. A.; Silva, G. T.; Santos, I. N.; **“Simulation and Dynamic Analysis of Three-Phase Photovoltaic System Connected on Grid Employing Matlab / Simulink Software”**, 2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Mai. 2018.

Sujoldzic, S; Watkins, J. M.; **“Stabilization of an arbitrary order transfer function with time delay using PI and PD controllers”**, 2006 American Control Conference, Print ISBN 14244-0209-3, Jun. 2006.

Teodorescu, R.; Liserre, M.; Rodriguez, P.; **“Grids Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems”**, Jhon wiley & sons, 2011.

Usluer, S. N.; Hava, A. M.; **“Investigation on Series Active Filter Compensated High Power Grid-Connected Voltage Source Inverters with LCL Filter”**, IEEE – Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), ISBN 978-1-4799-5776-7, Set. 2014.

Wu, E.; Lehn, P.; **“Digital current control of a voltage source converter with active damping of LCL resonance”**, IEEE - Transactions on Power Electronics, Vol. 21, Nº 05, pp. 1364-1373, Set. 2006.

Xin-Li, Y.; Long-Fu, L.; Jia-Zhu, X.; Wen-Di, L.; **“LCL output filter design and the influence to the D-STATCOM compensation characteristic”**, International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), Hunan Univ., Changsha, China, pp. 3133-3136, Set. 2011.

Yang, Y.; Blaabjerg, F.; **“Overview of Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems”**, Electric Power Components and Systems, v. 43, n. 12, pp. 1352-1363, Jul. 2015.

Yasdani, A.; Dash, P. P.; **“A control methodology and characterization of dynamics for a photovoltaic (PV) system interfaced with a distribution network”**, IEEE - Transactions on Power Delivery, v. 24, n. 3, pp. 1538-1551, Jul. 2009.

Zhang, X.; Yu, C.; Liu, F.; Li, F.; Cao, R.; **“Stability improvement of grid-connect inverter using combination of passive and active damping”**, Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, Print ISBN 978-1-4577-2085-7, Jun. 2012.